مهندسی متالورژی و مواد، ۳۴، ۲، ۱۴۰۲. (۵۱ -۶۶)



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات آلیاژ آلومینیوم تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم*

مقاله پژوهشی

راضیه شهریاری(۱) محمود شریفی تبار(۲) مهدی شفیعی آفارانی(۳)

DOI: 10.22067/jmme.2023.81263.1105

چکیده در این پژوهش با انجام آزمونهای متالورژیکی شامل کوانتومتری، آنالیز پراش اشعه ایکس (X-ray Diffraction (XRD))، بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (Field Emission Spectroscopy Electron Mircoscope (FESEM)) اطلاعات مربوط به ترکیب، ساختار و ریزساختار بیلت‌های ریخته‌گری و پروفیل‌های آلومینیومی ۶۰۶۳ تولیدی از قراضه‌های آلومینیومی در شرکت بلوچ آلومینیم زاهدان استخراج شده و تأثیر ریزساختار بر خواص مکانیکی آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی نشان داد که درصد آهن، سیلسیم و مس بیش از حد استاندارد ترکیب آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ بود. تصاویر میکروسکوپ نوری درصد بالای تخلخل‌ها و حفرات انقباضی به ویژه در مرکز بیلتهای ریخته‌گری‌شده را نشان داد. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نشان داد که علاوه بر فاز FCC زمینه، فاز آلومیناید آهن در ریزساختار شمش تشکیل شد. تشکیل این فاز توسط آنالیز طیف‌سنج پراکندگی انرژی در میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که حضور حفرات و به خصوص فاز ترد آلومیناید آهن سبب افت استحکام و شکل‌پذیری شد. استحکام کشش نهایی نمونه شرکت بلوچ آلومینیم در سطح بیلت در حدود ۱۰۳ مگاپاسکال و در مرکز شمش ۷۱ مگاپاسکال به دست آمد. شکست نگاری نمونه‌ها حاکی از درصد بالای حفرات در نمونه استخراج‌شده از مرکز بیلت و ترکیب شکست نرم و ترد ناشی از حضور فاز ترد آلومیناید آهن در سطح بیلت بود.

واژه‌های کلیدی ریخته‌گری، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳، ریزساختار، خواص مکانیکی.

Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Parts Manufactured by Balouch Aluminum Co

Raziyeh Shahriyari Mahmood Sharifitabar Mahdi Shafiee Afarani

Abstract *In the present study, metallurgical tests including quantometry, X-ray diffraction analysis, and microstructural investigations with optical and scanning electron microscopes were emplyed to investigate the effect of composition and microstructure on the mechanical properties of the cast ingots and extruded profiles manufactured in Balouch Aluminum Company. Results showed that the concentrations of Fe, Si and Cu were higher than the standard composition of 6063 Al alloy. Optical micrographs sowed that pores were mainly observed at the center of ingots. According to XRD analysis, in addition to FCC phase, an iron aluminide intermettalic phase was identified in the structure of ingots. The formation of intermetallic phase was confirmed by energy dispersive analysis attached to the scanning electron microscope. Tensile test results illustrated that the presence of pores and the distribution of intermetallic phases declined the strength and formability of the alloy. The ultimate tensile strengths at the surface and center of the ingot were 103 and 71MPa, respectively. Fractography of samples indicated that the presence of pores and the intermetallic phase led to a combination of ductile and brittle fracture durin tensile test.*

Keywords Casting, Extrusion, 6063 Aluminum Alloy, Microstructure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۳۱ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

(۳) استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Email: msharifitabar@eng.usb.ac.ir

مقدمه

آلومینیوم یکی از فلزاتی است که در جهان بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف آلومینیوم طی سه دهه گذشته (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) تقریبا ۳ درصد نرخ رشد سالانه را تجربه کرده و انتظار می‌رود این رشد در دو دهه آینده به میزان ۴ درصد در سال برسد [1]. این افزایش نرخ مصرف به دلیل خواص عالی آلومینیم، مانند استحکام ویژه بالا، مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی، غیر مغناطیسی، بازتاب نوری، بازیافت‌پذیری و شکل‌پذیری است. اما، تولید آلومینیوم شامل مراحلی از جمله فرایند الکترولیز برای استخراج آلومینیوم از آلومینا است و در این فرایند مقدار زیادی انرژی مصرف می‌شود [2].

امروزه بازیافت پسماندهای صنعتی در هر بخش، و بیش از آن در صنعت آلومینیوم، از اهمیت بالایی برخوردار است. بازیافت آلومینیوم می‌تواند منجر به صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش مصرف انرژی گردد. همچنین با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محیط زیست را از آلودگی حفظ کند [5-3]. آخرین آمارها نشان می‌دهد که تولید مستقیم آلومینیم، بسته به فناوری به‌کاررفته و ترکیب انرژی، تا ۲۰۰ مگاژول به ازای هر کیلوگرم انرژی مصرف می‌کند و ۳٪ از کل انتشار CO_2 در بخش‌های صنعتی را به خود اختصاص می‌دهد. از سوی دیگر، بسته به نوع و کیفیت قراضه و روش ذوب، مصرف انرژی در تولید ثانویه از ۷/۷ تا ۲۰ مگاژول به ازای هر کیلوگرم متغیر است [6].

تا کنون در زمینه بازیافت قراضه‌های آلومینیومی به روش های مختلف تحقیقات متنوعی انجام شده است [15-7]. اما روش ذوب علی‌رغم مشکلات عدیده مانند تلفات نسبتا بالای فلز به دلیل واکنش‌پذیری شیمیایی بالاتر و سطح ویژه بزرگتر براده‌های فلزی، تولید گازهای سمی از احتراق مواد روغنی چسبیده به قراضه‌ها، مصرف انرژی و هزینه‌های بازیافت نسبتا بالاتر، هنوز هم به عنوان یک روش پرکاربرد در کشورهای در حال توسعه جهت تولید آلومینیوم و آلیاژهای آن استفاده می‌شود.

شرکت تعاونی سه هزار و هشتصد و هشتاد و نه تولید لوله و پروفیل بلوچ آلومینیوم یکی از بزرگترین شرکت‌های تولید پروفیل‌های آلومینیومی در استان سیستان و بلوچستان است. در این شرکت فرایند تولید این پروفیل‌ها شامل ذوب قرا ضه‌های آلومینیومی و تبدیل آنها به بیلت و سپس اکستروژن یا فشارکاری بیلت‌ها به منظور تولید پروفیل است. هدف نهایی از فرایند ریخته‌گری و اکستروژن، تولید آلیاژ ۶۰۶۳ آلومینیوم است. لذا این شرکت را می‌توان جزو معدود شرکت‌های فعال در حوزه صنعت متالورژی در استان سیستان و بلوچستان دانست.

مهمترین چالش پیش روی شرکت‌های فعال در حوزه ریخته‌گری قطعات آلومینیومی، کنترل ترکیب شیمیایی مذاب تولیدی از شارژهای مختلف و شناسایی مهمترین عناصر ناخالصی تأثیرگذار بر خواص شمش تولیدی است. کیفیت محصولات تولیدی معمولا با شاخص‌هایی مانند ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی ارزیابی می‌شود. از آنجا که مواد اولیه ورودی به کارخانه بلوچ آلومینیوم به عنوان یک شرکت بزرگ فعال در حوزه بازیافت آلومینیوم، قراضه‌های آلومینیومی مختلف مانند بطری، پروفیل‌ها، پرچ‌ها، پره‌های خنک‌کننده و غیره است، در این تحقیق تلاش شد تا مهمترین عناصر ناخالصی موجود در مذاب حاصل از این نوع شارژ در چندین نوبت مذاب‌ریزی متفاوت شناسایی شده و تأثیر این ناخالصی‌ها بر ریزساختار و خواص مکانیکی محصول تولیدی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهکاری برای سایر شرکت‌های فعال در این حوزه باشد.

مواد و روش تحقیق

تولید بیلت‌ها در شرکت بلوچ آلومینیوم

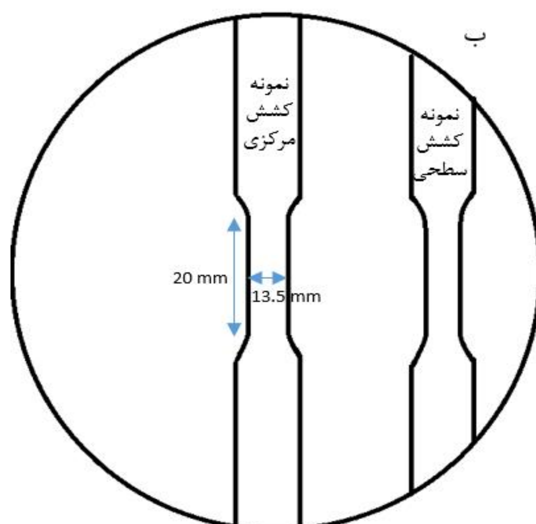
در شرکت بلوچ آلومینیوم، قراضه‌های آلومینیومی در ابتدا دسته‌بندی شده و برخی از قطعات با درصد سیلسیم بالا مانند سیلندرهای آلومینیمی حذف می‌شود تا در حد امکان، قراضه‌های با درصد خلوص بالا به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گیرد. سپس، مواد اولیه پرس شده و به درون کوره شعله‌ای با گنجایش تولید ۲ تن مذاب در هر مرحله شارژ می‌شوند. حرارت لازم جهت ذوب کردن قراضه‌ها از طریق مشعل فراهم می‌شود. پس از تولید مذاب، فرایند هم‌زدن توسط یک هم‌زن فولادی که به درون مذاب وارد می‌شود، صورت می‌گیرد تا فرایند خروج سرباره از درون مذاب تسهیل گردد. از آنجا که هدف فرایند ریخته‌گری تولید آلیاژ ۶۰۶۳ با مقادیر ۰/۲ تا ۰/۶ درصد وزنی

سیلسیم و ۰/۴۵ تا ۰/۹ درصد وزنی منیزیم جهت تولید پروفیلهای در و پنجره است، در انتهای فرایند، قطعات منیزیمی با خلوص بالای ۹۸ درصد به مذاب اضافه می‌شود. جدول ترکیب آلومینیوم ۶۰۶۳ در چهار ذوب در جدول (۱) نشان داده شده است. میزان منیزیم اضافه‌شده بر اساس تجربه در حدود ۱ تا ۱/۵ کیلو به ازای هر تن مذاب است که در صورت بازیابی کامل آن در حین تولید مذاب و ریخته‌گری و با فرض عدم اتلاف این عنصر، درصد آن در آلیاژ نهایی در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ درصد وزنی خواهد بود. سپس مذاب به بوته ۵۰۰ کیلویی منتقل شده و پس از گاززدایی توسط قرص دگازورهگزاکلرواتان به مدت ۱۰ دقیقه، با دمای ۷۰۰ تا ۷۲۰ سانتی‌گراد از طریق سیستم راهگاهی چدنی به سمت قالب‌های ریخته‌گری چدنی استوانه‌ای با قطر داخلی ۱۵۰ میلی‌متر، ضخامت ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر هدایت شد. پس از انجماد و خنک شدن، بیلت‌ها از درون قالب خارج می‌شود. بیلتهای تولیدی در فرایند ریخته‌گری وارد گارگاه شکل‌دهی می‌شود تا از طریق فرایند اکستروژن به پروفیل‌های آلومینیومی تبدیل شود. شکل (۱–الف) بیلت‌های تولیدی را نشان می دهد.

جدول ۱ مقایسه ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم با ترکیب استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳

نام نمونه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
بلوچ آلومینیوم–۱	۰/۶۴	۱/۰۰	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۰۲	مابقی
بلوچ آلومینیوم–۲	۰/۶۴	۱/۱۰	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۲۳	۰/۱۸	۰/۰۲	مابقی
بلوچ آلومینیوم–۳	۰/۶۵	۱/۰۵	۰/۳۲	۰/۱۱	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۰۲	مابقی
بلوچ آلومینیوم–۴	۱/۰۵	۱/۱۲	۰/۵۱	۰/۱۶	۰/۲۰	۰/۳۸	۰/۰۲	مابقی
ایرالکو	۰/۳۴	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۷	۰/۰۱	۰/۰۱	مابقی
استاندارد ASTM	۰/۰–۲/۶	<۰/۳۵	<۰/۱	<۰/۱	۰/۰–۴۵/۹	<۰/۱	<۰/۱	مابقی





شکل ۱ (الف) نمونه‌ای از بیلت‌های تولیدی توسط فرایند ریخته‌گری در شرکت بلوچ آلومینیوم،
(ب) طرحواره نحوه استخراج و ابعاد نمونه آزمون کشش

شناسایی مشخصات بیلت‌های تولیدی

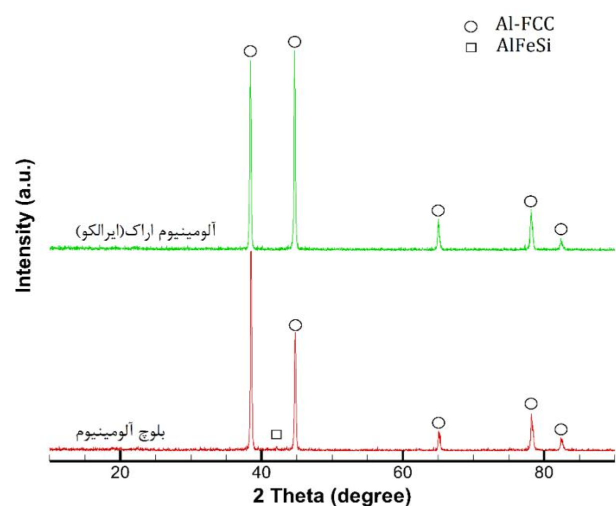
به منظور شناسایی مشخصات متالورژیکی قطعات تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم، آزمونهای مختلف برای تعیین ترکیب شیمیایی، ساختار، ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها انجام شد. جهت تعیین ترکیب شیمیایی بیلت‌های ریخته‌شده، از ۱۰ ذوب متفاوت کوره در روزهای مختلف نمونه‌برداری شده و توسط آنالیز کوانتومتری با دستگاه PMI MASTER SMART مورد بررسی قرار گرفت. به منظور شناسایی فازهای موجود در آلیاژ از آنالیز پراش پرتو ایکس (X-Ray diffraction) با طول موج مس (۱/۵۴۰۶ انگستروم) توسط دستگاه BRUKER Advanced D8 مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، برای شناسایی فازهای موجود در نمونه‌ها از نرم‌افزار X'pert High Score استفاده شد. جهت شناسایی ریزساختار و نحوه توزیع فازها در آلیاژ، نمونه‌های آزمون متالوگرافی از سطح و مرکز بیلت تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم استخراج شد. جهت مقایسه خواص محصولات تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم با یک آلیاژ استاندارد، نمونه‌های آزمون متالوگرافی و کشش از شمش تولیدی توسط شرکت آلومنیوم اراک (ایرالکو) نیز استخراج شد. سپس این نمونه‌ها مانت شده و عملیات سنباده‌زنی و پولیش روی آنها صورت گرفت. جهت ظاهر شدن فازها از محلول حکاکی ۰/۵ درصد اسید هیدرو فلوریک (HF) برای مدت ۳۰ ثانیه استفاده شد. در نهایت، ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus مشاهده و عکس‌برداری شد. جهت بررسی دقیق‌تر فازهای موجود در ریزساختار از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی انتشار میدانی مدل‌های FESEM MIRA3 TESCAN مجهز به طیف‌سنج تفکیک عنصری EDS-SAMX و میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی KYKY مجهز به طیف‌سنج تفکیک انرژی OXFORD استفاده شد. در نهایت، جهت تعیین خواص مکانیکی بیلت‌های تولیدی، نمونه‌های آزمون کشش در راستای قطر بیلت از سطح و مرکز بیلت تهیه شد. ضخامت نمونه‌ها ۴/۵ میلیمتر، عرض آنها ۱۳/۵ میلیمتر، طول سنجه ۲۰ میلیمتر، شعاع انحنای فیلت ۶ میلیمتر و طول کل نمونه بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ میلیمتر بود. شکل (۱-ب) طرحواره نحوه استخراج و ابعاد نمونه آزمون کشش را نشان می‌دهد. سپس، آزمون کشش توسط دستگاه یونیورسال Instron 4501 با نرخ کرنش ۱ میلیمتر بر دقیقه انجام شده و نمودار تنش بر حسب کرنش رسم شد. در نهایت، سطح شکست نمونه‌ها برای تعیین سازوکار شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی MIRA3 Tescan مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم در ۴ ذوب متفاوت، ترکیب آلیاژ ۶۰۶۳ تولیدی توسط شرکت آلومینیوم اراک (ایرالکو) به عنوان نمونه شاهد و ترکیب شیمیایی استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳ بر اساس استاندارد ASTM را نشان می‌دهد [16]. شایان ذکر است که ترکیب سایر نمونه‌ها به جهت مشابهت با این نمونه‌ها در جدول ذکر نشده است. ملاحظه می‌شود که آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ جزء آلیاژ های آلومینیم-منیزیم- سیلسیم است که ترکیب آن مطابق استاندارد حاوی ۰/۴۵ تا ۰/۹ منیزیم و ۰/۲ تا ۰/۶ سیلسیم است. علاوه بر این، درصد آهن به عنوان یک ناخالصی مهم باید کمتر از ۰/۳۵ درصد وزنی و درصد سایر عناصر مانند مس و کروم نیز کمتر از ۰/۱ درصد وزنی باشد [16]. اما، در ترکیب شیمیایی بیلت تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم، مقدار سیلسیم بین ۰/۶۴ تا ۰/۶۵ در صد وزنی تغییر می‌کند که این میزان سیلسیم بالاتر از حد استاندارد است. علاوه بر این، درصد منیزیم بین ۰/۲۲ تا ۰/۲۶ درصد وزنی تغییر می‌کند که به میزان قابل توجهی کمتر از حد استاندارد این عنصر در ترکیب آلیاژ ۶۰۶۳ است. در کنار این موارد حضور درصد بالای آهن در ترکیب آلیاژ تولیدی را شاید بتوان مهمترین چالش موجود در مرحله ساخت آلیاژ دانست. همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می شود، درصد آهن در ترکیب آلیاژ تولیدی بیش از سه برابر بیشینه حد مجاز این عنصر در ترکیب استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳ است. در خصوص عناصر مس و روی نیز درصد آنها در ترکیب آلیاژ بیش از حد مجاز آنها مطابق استاندارد است. با عنایت به آنچه در جدول (۱) ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب آلیاژ تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم شباهتی به ترکیب آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ ندارد. در ادامه، با توجه به بررسی های ریزساختاری، تأثیر مخرب این عناصر و به خصوص آهن بر خواص آلیاژ مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

شکل (۲) الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ آلومینیوم تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم و شرکت ایرالکو را با یکدیگر مقایسه

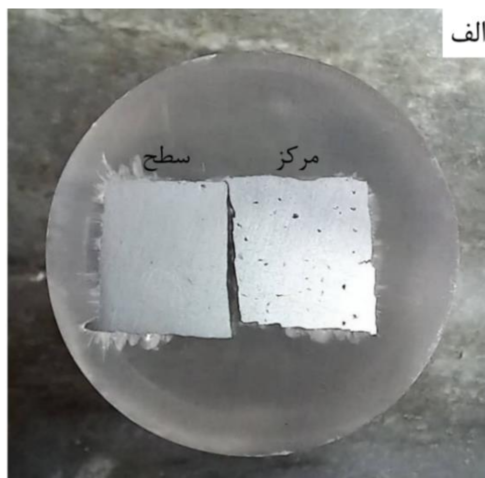
کرده اســـت. ملاحظه می‌شـــود که فاز محلول جامد آلومینیوم با ســـاختار کریســـتالی FCC به عنوان فاز اصـــلی در هر دو آلیاژ تشکیل شده است. علاوه بر این، در الگوی پراش نمونه شرکت بلوچ آلومینیوم یک پیک ضعیف در زاویه پراش حدود ۴۲ درجه مشـــاهده شـــد که با پیک‌های فاز آلومیناید آهن (AlFeSi) همپوشانی دارد. اما به دلیل عدم حضور سایر پیک‌های مشخصه این فاز در الگوی پراش، نمی‌توان در مورد حضور آن در ساختار آلیاژ با قطعیت نظر داد. به همین منظور جهت شـــناســـایی بهتر فازهای ثانویه، بررسی‌های ریزساختاری انجام شد.



شکل ۲ الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳ تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم و شرکت ایرالکو

جهت شناسایی فازهای موجود در ریزساختار شمش‌های ریختگی، نمونه‌هایی از سطح و مرکز بیلت‌های تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم و شرکت ایرالکو تهیه شد. سپس، این نمونه‌ها در آزمایشگاه متالوگرافی مانت شده و پس از پولیش‌کاری با چشم غیر مسلح مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر این نمونه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

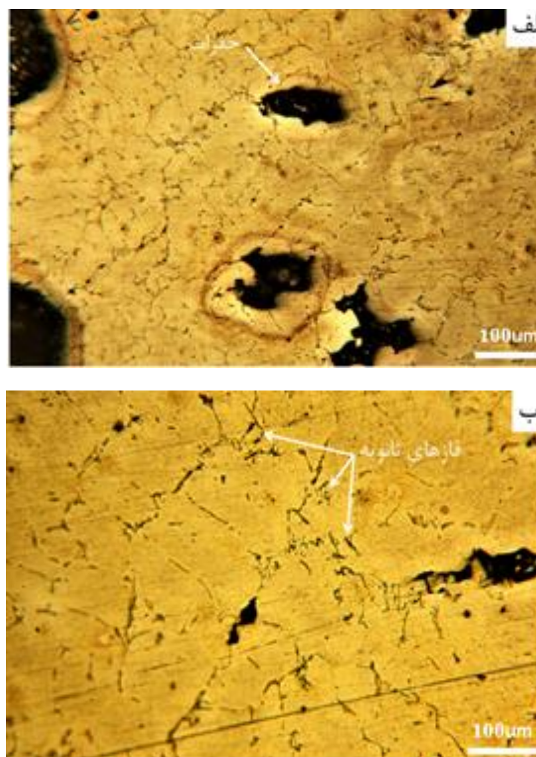
ملاحظه می‌شود که در شمش‌های تولیدی توسط شرکت ایرالکو، هم سطح و هم مرکز شمش عاری از عیوب ماکروسکوپی مانند تخلخل، ترک و ناخالصی غیر فلزی است. اما در شمش تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم مرکز قطعه دارای حجم بالایی از تحلخل با شکل نامنظم است. علت تشکیل این تخلخل‌ها آن است که در هنگام سرد شدن مذاب درون قالب، انجماد بیلت از سطح قالب آغاز می‌شود و جبهه انجماد به سمت مرکز قالب حرکت می‌کند [17]. لذا مرکز شمش در آخرین مرحله منجمد می‌شود و انقباض فلز مذاب در حین انجماد می‌تواند یکی از دلایل اصلی تشکیل این حفرات در انتهای انجماد باشد. نکته بسیار مهم آن است که شواهدی مربوط به حضور ناخالصی‌های سرباره‌ای در ریزساختار شمش تولید توسط شرکت بلوچ آلومینیوم مشاهده نشد.





شکل ۳ تصاویر نمونه‌های استخراج شده از سطح و مرکز شمش‌های ریخته شده در (الف) شرکت بلوچ آلومینیوم و (ب) شرکت ایرالکو

شـــکل (۴) تصـــاویر متالوگرافی نوری مرکز شـــمش تولیدی توسط شرکت‌های بلوچ آلومینیوم در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

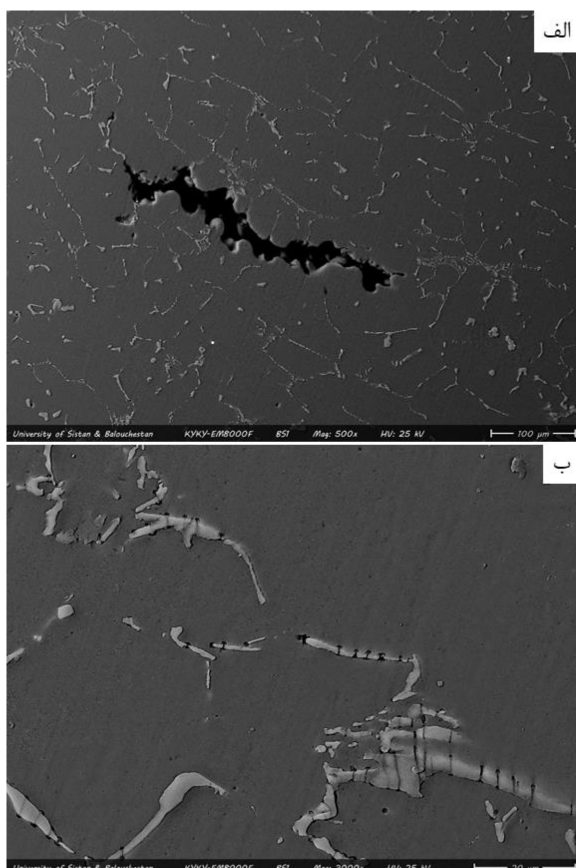


شکل ۴ تصویر متالوگرافی نوری در بزرگنمایی‌های مختلف از مرکز بیلت آلومینیومی تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم

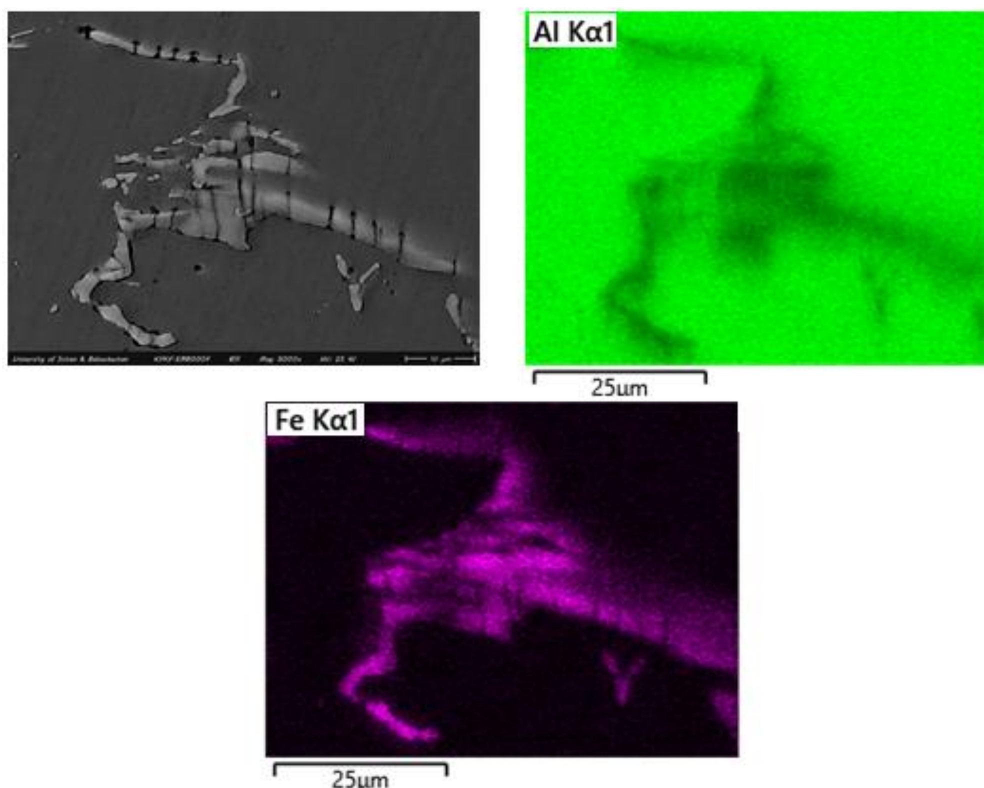
همان گونه که مشاهده می شود، ریز ساختار شمش تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم علاوه بر حضور حفرات، دارای فاز تیغه‌ای تیره رنگی است که عموما در مرزدانه‌ها تشکیل شده‌اند. حفرات هم دارای اشکال کروی و هم اشکال نامنظم هستند. حفرات کروی معمولا ناشی از به دام افتادن گازها در حین انجماد و حفرات نامنظم به دلیل انقباضات انجمادی تشکیل می‌شوند. لذا، منشأ تشکیل حفرات در مرکز شمش را می‌توان به این دو عامل نسبت داد. به منظور بررسی دقیقتر فازهای ثانویه تشکیل شده در ریزساختار بیلتها از میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی استفاده شد. شکل (۵) تصاویر میکرو سکوپی الکترونی روبشی (SEM) شمش تولیدی تو سط شرکت بلوچ آلومینیوم در دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. علاوه بر یک حفره بسیار بزرگ، ذرات فاز ثانویه به رنگ رو شن در زمینه تیره قابل مشاهده است. در صد فاز ثانویه با نرم افزار Image J در حدود ۴ درصد تخمین زده شد.

جهت شناسایی دقیق فازهای ثانویه از آنالیز نقشه توزیع عناصر (MAP) استفاد شد که نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به درصد اندک عناصر منیزیم و سیلسیم در زمینه و ذرات ثانویه، نقشه توزیع این عناصر ارائه نشد. ملاحظه می‌شود که زمینه غنی از آلومینیوم است، اما ذرات فاز ثانویه با مورفولوژی تیغه‌ای دارای مقدار کمتر آلومینیوم و درصد بالای آهن است. علاوه بر این، ترک‌هایی نیز در راستای عرضی ذرات ثانویه دیده می‌شود که نشان از تردی بالای آنها دارد.

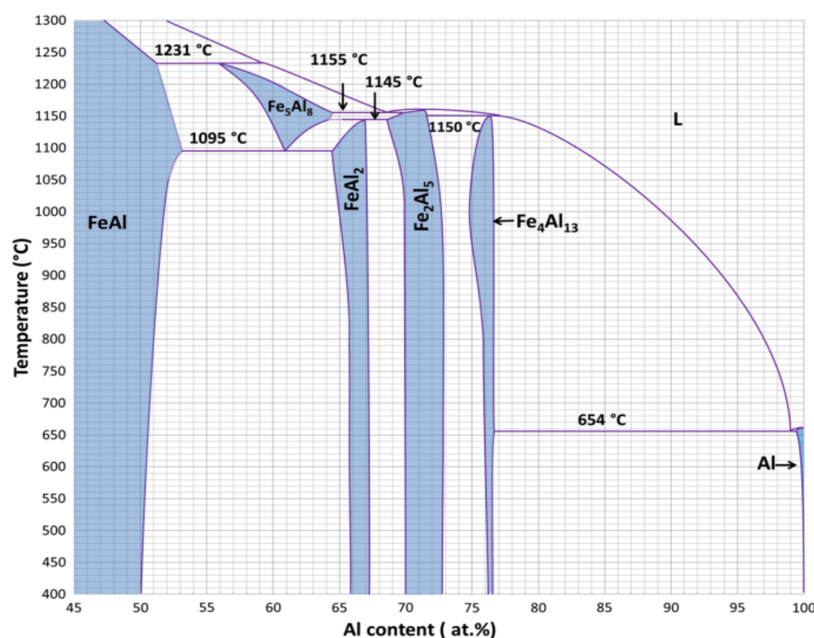
همان گونه که در آنالیز پراش ا شعه ایکس ن شان داده شد، شواهدی مبنی بر حضور فاز غنی از آهن در ریزساختار بیلت آلومینیوم تولید شده در شرکت بلوچ آلومینیوم مشاهده شد، اما به دلیل درصد پایین این فاز، تمامی پیک‌های مشخصه آن در الگوی پراش اشعه ایکس ظاهر نشد. نتایج آنالیز MAP نشان داد که این فاز غنی از آهن و آلومینیوم است. لذا، به منظور تعیین دقیقتر نوع ترکیب تشکیل شده در این نمونه از نمودار فازی آلومینیوم-آهن در قسمت غنی از آهن ا ستفاده شد که در شکل (۷) نشان داده شده است [18].



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی شمش تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم در دو بزرگنمایی مختلف



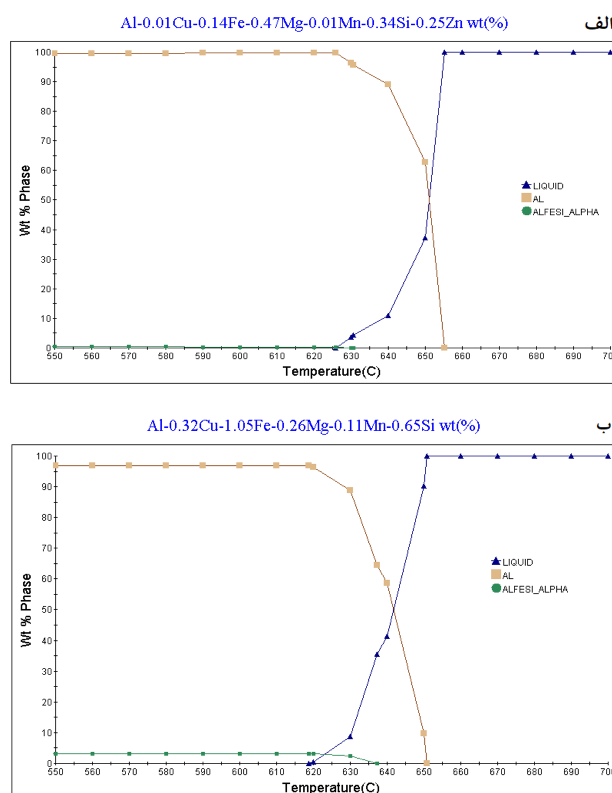
شکل ۶ نقشه توزیع عناصر در فاز ثانویه تشکیل شده در ریزساختار بیلت ریختگی آلیاژ آلومینیوم در شرکت بلوچ آلومینیوم



شکل ۷ نمودار فازی دوتایی آلومینیوم–آهن در بخش غنی از آهن [18]

نتایج آنالیز کوانتومتری نشان داد که درصد آهن در آلیاژ در حدود ۱ درصد وزنی است. به دلیل چگالی بالای آهن، درصد اتمی آن در ترکیب کلی آلیاژ از ۱ درصد نیز کمتر خواهد بود. لذا جهت بررسی فازها با توجه به این نمودار فازی باید سمت راست نمودار را مد نظر قرار دارد. ملاحظه می‌شود که حد حلالیت آهن در آلومینیوم در دمای محیط تقریبا صفر است. لذا تمامی آهن در واکنش با آلومینیوم منجر به تشکیل ترکیب بین فلزی آلومیناید آهن خواهد شد. شایان ذکر است که انحلال جزئی سایر عناصر

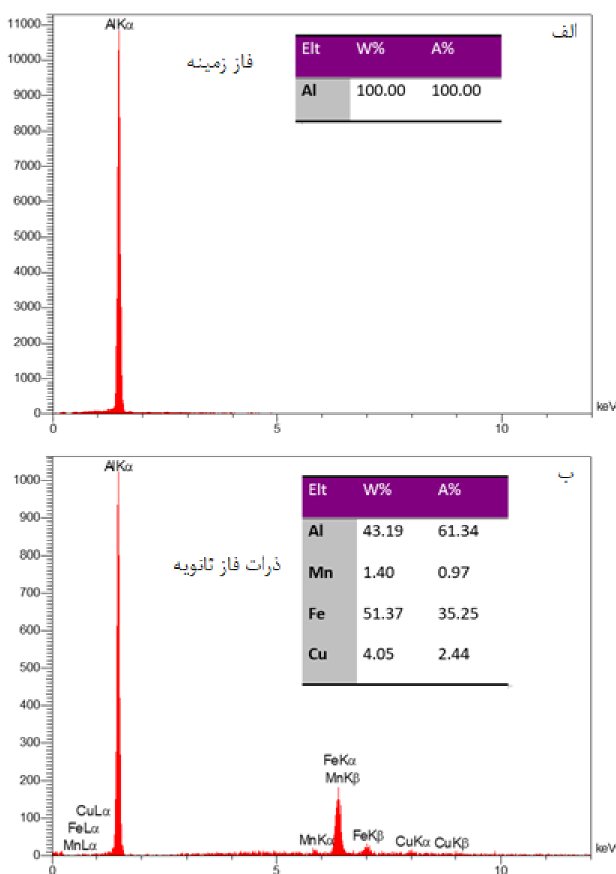
مانند سیلسیم و منگنز می‌تواند ترکیب این فاز را دچار تغییراتی کند. شکل (۸) رفتار انجمادی دو نمونهٔ آلومینیمی شرکت ایرالکو و بلوچ آلومینیم را نشان می‌دهد. این نمودار با توجه به ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم تولیدی توسط این دو شرکت و با استفاده از نرم‌افزار JMat Pro رسم شده است. با دقت در نمودار مشاهده می‌شود (شکل ۸–الف) که به دلیل حضور آهن در ترکیب شیمیایی نمونه بلوچ آلومینیوم، فاز آلومیناید آهن در حین انجماد تشکیل می‌شود که با نتایج تجربی همخوانی دارد.



شکل ۸ رفتار انجمادی دو نمونهٔ آلومینیومی: (الف) شرکت ایرالکو و (ب) بلوچ‌آلومینیم شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار JMat Pro

با توجه به نمودار فازی آلومینیوم–آهن و منحنیهای رسم شده، مسیر انجمادی برای آلیاژ را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد. در مقادیر آهن کمتر از ۱ درصد اتمی انجماد با تشکیل فاز آلومینیوم جامد آغاز می شود. به دلیل قابلیت انحلال اندک آهن در آلومینیوم، این عنصر به درون مذاب پس زده شده و لذا با پیشروی انجماد، مذاب باقی مانده غنی از آهن می شود. در نهایت، مذاب حاوی آهن در طی واکنش یوتکتیک به دو فاز محلول جامد آلومینیوم و ترکیب بین فلزی آلومیناید آهن تبدیل می شود. تشکیل ترکیب بین فلزی در مرزدانه‌ها می‌تواند تأییدی بر مسیر انجمادی ذکر شده باشد. رگه‌های تیره درون ترکیب بین فلزی ممکن است فاز آلومینیوم ناشی از انجماد یوتکتیک و یا ترکهای تشکیل شده در حین انجماد باشد. در صورتی‌که این رگه‌ها ترک باشند، تشکیل آنها ممکن است به‌دلیل اختلاف قابل‌توجه ضریب انبساط آلومینیوم با ساختار کریستالی FCC و ترکیب بین فلزی و تنش‌های ناشی از آن در حین سرد شدن ایجاد شده باشد.

با جمع‌بندی نتایج برر سی‌های ریز ساختاری می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر کمبود درصد منیزیم و بالا بودن درصد سیلیسیم، مس و روی در ترکیب آلیاژ تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم در مقایسه با ترکیب استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳ که برای ساخت پروفیلها استفاده می‌شود، حضور درصد بالای آهن سبب تشکیل یک ترکیب بین فلزی ترد در ساختار آلیاژ در هنگام ریخته‌گری شده است. شکل (۹) طیف آنالیز EDS زمینه آلومینیومی و ذرات ثانویه را نشان می‌دهد.

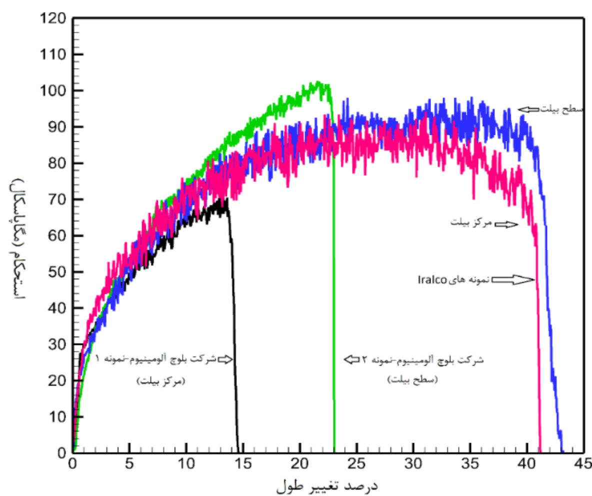


شکل ۹ الگوی طیف‌سنج انرژی فاز زمینه و ذرات فاز ثانویه در ریزساختار بیلت تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم

همان گونه که مشــاهده می‌شــود، زمینه غنی از آلومینیوم و ذرات فاز ثانویه حاوی عناصــر آهن، مس و منگنز اســت. علاوه بر این، در صد سیلسیم در ذرات فاز ثانویه بسیار اندک ا ست. لذا، به نظر می‌رســد که علاوه بر آهن، عناصــر مس و منگنز نیز در ترکیب ذرات فاز ثانویه قرار گرفته‌اند. از آنجا که این ترکیب بین فلزی در واکنش یوتکتیک ایجاد می‌شـــود، لذا نمی‌توان از عملیـات حرارتی همگن‌ســـــازی برای انحلال مجـدد آن در ریزساختار استفاده کرد.

به‌منظور مقایسه خواص مکانیکی بیلت‌های تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم و شرکت آلومینیم اراک، نمونه‌هایی از بیلتها استخراج و آزمون کشش بر روی آنها انجام شد. منحنی تنش–کرنش حاصل از این آزمون در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از هر بیلت، منحنی مربوط به دو نمونه استخراج‌شده آورده شده است. یکی از این نمونه‌ها از مرکز شمش و دیگری از کناره-های شمش گرفته شد. اطلاعات حاصل از این نمودارها در جدول (۲) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، رفتار مکانیکی بیلت آلومینیوم تولیدی توسط شرکت آلومینیوم اراک (ایرالکو) در سطح و مرکز شمش تقریبا یکسان است و آلیاژ شکل‌پذیری قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. مقدار استحکام کششی در محدوده ۹۳ تا ۱۰۳ مگاپاسکال متغیر است که مقدار بالاتر استحکام در سطح را تا حدودی می‌توان به انجماد سریع آن و ریزتر بودن اندازه دانه‌ها نسبت داد. اگر چه این بیلت پس از ریخته‌گری تحت عملیات حرارتی همگن‌سازی قرار گرفته است، اما تأثیر اختلاف سرعت انجماد در سطح و مرکز بیلت و جدایش عناصر آلیاژی در این دو ناحیه می‌تواند تا مدتها در ساختار شمش باقی بماند [19]. مقدار درصد تغییر طول نیز در این شمش تقریبا در نواحی مختلف یکسان است. در سوی دیگر، مقدار شکل‌پذیری در بیلت تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم در حدود ۵۰ درصد کمتر از نمونه مشابه تولیدی توسط شرکت ایرالکو است. علاوه بر این، بین استحکام و شکل‌پذیری بیلت در ناحیه مرکزی و سطحی اختلاف معناداری وجود دارد. به عبارت دیگر، مقدار استحکام و شکل‌پذیری شمش در ناحیه مرکزی بسیار کمتر از سطح شمش است. به‌منظور بررسی دقیقتر علت پایین بودن استحکام آلیاژ بیلت، سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی مورد بررسی قرار گرفت.

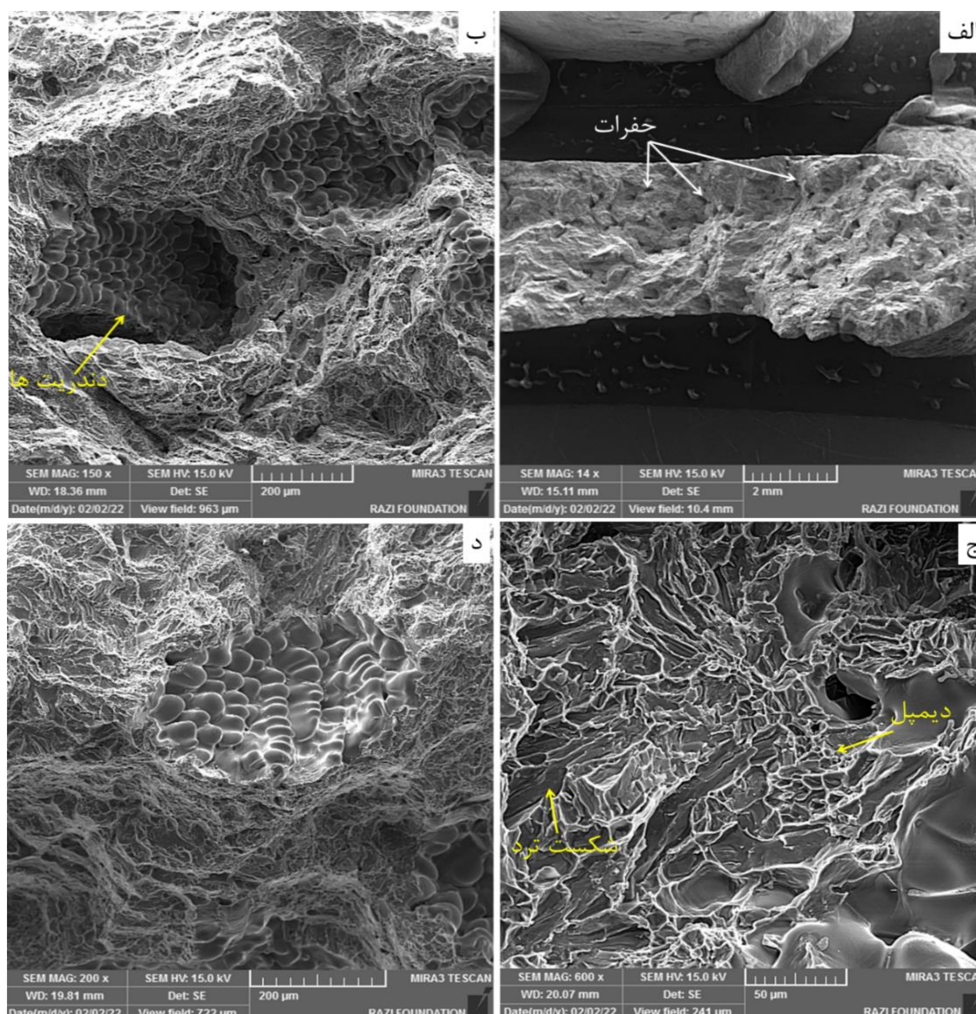
شکل (۱۱) تصویر میکرو سکوپی الکترونی روبشی سطح شــکســت نمونه اســتخراج‌شــده از مرکز بیلت تولیدی توســط شــرکت بلوچ آلومینیوم در بزرگنمایی‌های مختلف را نشــان می‌دهد. تصویر با بزرگنمایی کم در شکل (۱۱–الف) نشان‌دهنده حضور میزان قابل‌توجهی از حفرات در سطح شکست است.



شکل ۱۰ منحنی آزمون کشش انجام شده بر روی بیلت‌های تولیدی توسط شرکت‌های بلوچ آلومینیوم و آلومینیوم اراک (ایرالکو)

جدول ۲ اطلاعات حاصل از منحنی‌های آزمون کشش و نتایج استاندارد آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۳

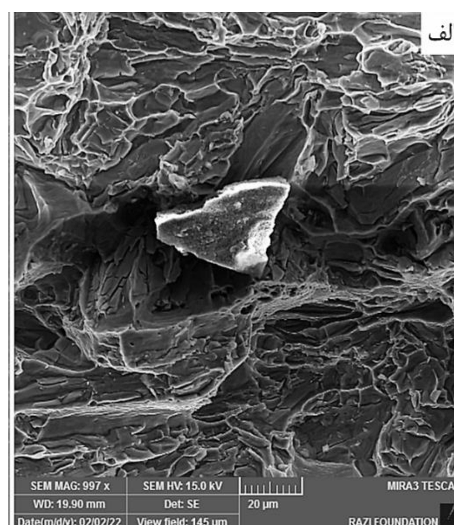
نام نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	قابلیت تغییر طول (%)
بلوچ آلومینیوم–مرکز بیلت	۷۱	۳۰	۱۴/۵
بلوچ آلومینیوم–سطح بیلت	۱۰۳	۳۷	۲۳
ایرالکو–مرکز بیلت	۹۳	۳۱	۴۱
ایرالکو–سطح بیلت	۹۷	۳۳	۴۳
خواص استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳–T6 [16]	>۱۹۰	>۱۶۰	>۸

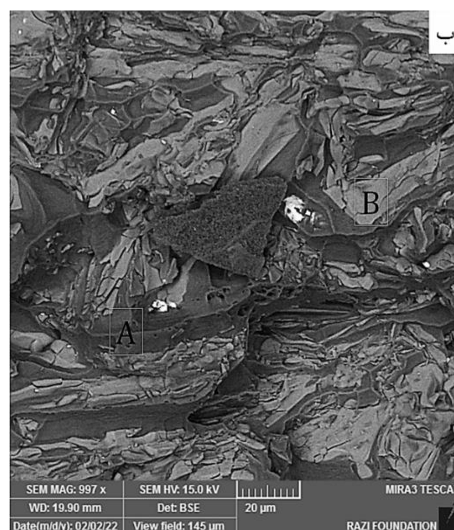


شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه استخراج شده از مرکز بیلت تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم در بزرگنمایی‌های مختلف

تصویر با بزرگنمایی این حفرات در شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-د) نشان داده شده است. انتهای دندریت‌های انجمادی درون این حفرات به وضوح قابل مشاهده است. همان گونه که قبلا در بررسی‌های ریزساختاری نشان داده شد، مرکز بیلت تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم دارای درصد بالایی از حفرات بود. لذا می‌توان قابلت شکل‌پذیری پایین نمونه آزمون کشش استخراج-شده از مرکز بیلت را تا حدود زیادی به حضور این حفرات انجمادی نسبت داد. شکل (۱۱-ج) نشان می‌دهد که سطح شکست نمونه در نواحی بدون حفره، که تحمل کننده اصلی بار کششی بوده است، داری دیمپل‌هایی است که نشان دهنده شکست نرم در این نواحی می‌باشد. علاوه بر این، حضور صفحات تورقی در برخی از نواحی حاکی از مکانیزم شکست ترد است. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که شکست آلیاژ تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم به صورت تلفیقی از شکست نرم و ترد بوده است. لازم به ذکر است که میزان حفرات در سطح شکست نمونه استخراج شده از سطح بیلت بسیار کمتر از مرکز نمونه بود. به عبارت دیگر، به نظر می‌رسد که بالاتر بودن قابلیت شکل‌پذیری و استحکام آلیاژ در سطح بیلت را می‌توان به کمتر بودن درصد تخلخلها در ساختار بیلت در این ناحیه نسبت داد. اما، به طور کلی مقدار شکل‌پذیری این آلیاژ در مقایسه با آلیاژ تولیدی توسط شرکت ایرالکو و به خصوص نمونه استاندارد بسیار کمتر بود. در شکل (۱۲-ب) دو فاز مختلف با رنگهای تیره و روشن در سطح قابل شناسایی است. فاز تیره با حرف لاتین A نامگذاری شده است حاوی ۹۹ درصد وزنی آلومینیوم و فاز روشن با حرف لاتین B نامگذاری شده است حاوی ۵۱ درصد وزنی آهن، ۴ درصد وزنی مس، ۱/۴ درصد وزنی منگنز و مابقی آلومینیوم بود. این نتایج نشان دهنده حضور عناصر آهن، مس و منگنز در ترکیب ذرات فاز ثانویه است. نکته بسیار مهم آن است

که مکانیزم شکست ترد در اثر شکست فاز آلومیناید آهن ایجاد شده است. به عبارت دیگر، با مقایسه شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) می‌توان نتیجه گرفت که در نواحی حضور این فاز در سطح شکست، مکانیزم شکست ترد مشاهده می‌شود. بنابراین، شکل‌پذیری پایین آلیاژ تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم در مقایسه با آلیاژ ۶۰۶۳ تولیدی توسط شرکت آلومینیوم اراک را می‌توان به حضور فاز آلومیناید آهن در ساختار آلیاژ شرکت بلوچ آلومینیوم نسبت داد.

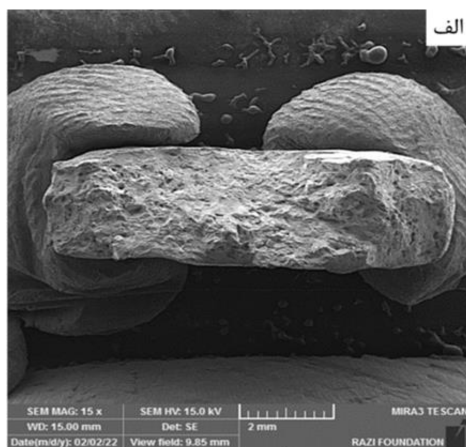


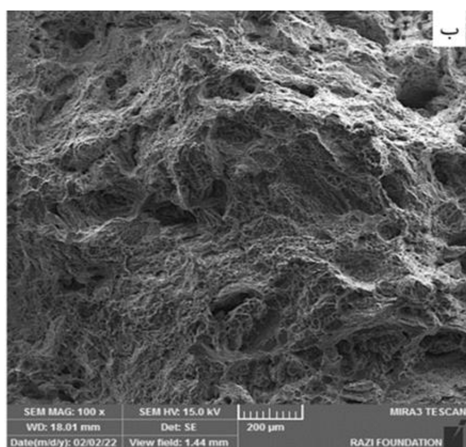


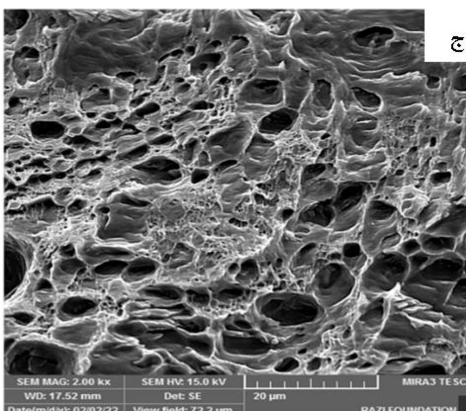
شکل ۱۲ تصویر سطح شکست نمونه استخراج شده از سطح بیلت تولیدی توسط شرکت بلوچ آلومینیوم، (الف) تصویر الکترون‌ها ثانویه، (ب) تصویر الکترون‌های برگشتی

شکل (۱۳) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) سطح شکست نمونه استخراج‌شده از بیلت تولیدی توسط شرکت ایرالکو در بزرگنمایی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

حضور دیمپل‌ها در سطح شکست بیان‌کننده مکانیزم شکست نرم در این نمونه است که با نتایج آزمون کشش همخوانی دارد. علاوه بر این، در تصویر با بزرگنمایی کم در شکل (۱۳-الف) حفرات بزرگی در سطح شکست دیده می‌شود. تصویر با بزرگنمایی بالاتر یکی از این حفرات در شکل (۱۳-ج) نشان دهنده آن است که این حفرات در اثر جدایش آلیاژ در حین آزمون کشش ایجاد شده و مربوط به فرایند ریخته‌گری نیست.







شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه استخراج شده از بیلت تولیدی توسط شرکت ایرالکو در بزرگنمایی‌های مختلف

با جمع‌بندی نتایج آزمون کشـــش می‌توان نتیجه گرفت که تشـکیل حفرات در مرکز بیلت ریختگی تولیدشــده در شـرکت بلوچ آلومینیوم یکی از مهمترین عوامل کاهش اســتحکام و شـکل‌پذیری آلیاژ تولیدی اسـت. علاوه بر این، حضـور در صد بالای آهن و مس و تشـکیل ترکیب بین فلزی آلومیناید آهن در ساختار بیلت سبب تردی آلیاژ و کاهش شکل‌پذیری آن شده است.

نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش شناسایی مشخصات و کیفیت محصولات آلومینیومی تولیدی در شرکت بلوچ آلومینیوم زاهدان از دیدگاه متالورژیکی و ارائه راهکارهای لازم برای بهبود کیفیت این محصولات است. بدین منظور، پس از معرفی مراحل تولید، بررسی‌های متالورژیکی و ریزساختاری بر روی بیلت‌ها و پروفیل‌های تولیدی توسط این شرکت انجام شد. مهمترین نتایج حاصل به شرح زیر است.

۱. ترکیب شــیمیایی آلیاژ تولیدی در شــرکت بلوچ آلومینیوم با ترکیب استاندارد آلیاژ ۶۰۶۳ آلومینیوم بسیار متفاوت است. در صد منیزیم در آلیاژ کمتر از حد استاندارد و در صد آهن، مس و سیلسیم بیشتر از حد استاندارد بود.

۲. حضــور درصــد بالای آهن در ترکیب بیلت تولیدی سـبب تشکیل فاز ترد آلومیناید آهن شد. این فاز در حین انجماد و در اثر پایین بودن حد حلالیت آهن در درون ســاختار انجمادی آلومینیوم تشکیل شد.

۳. تشــکیل حفرات در ریزســاختار شــمش و حضــور فاز ترد آلومیناید آهن سبب کاهش شدید استحکام و به خصوص شکل‌پذیری بیلت ریخته‌گری شده گردید.

۴. حذف آهن به عنوان یکی از مهمترین راهکارهای بهبود کیفیت محصولات تولیدی مطرح شد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات مدیران محترم شرکت بلوچ آلومینیوم زاهدان که در خصوص تهیه نمونه‌های استفاده‌شده در این پژوهش کمال همکاری و مساعدت را داشتند، تقدیر و تشکر نمایند.

مراجع

[1] C. Nappi, “The global aluminium industry 40 years from 1972,” *https://www.thealuminiumstory.com*, Feb. 2013. [Online], Avaiable: http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/mclaughlin1/docs/nappi.pdf, [Accessed Aug 13, 2023]

[2] J. Marks, P. Nunez, “Updated Factors for Calculating PFC Emissions from Primary Aluminum Production” In: *Light TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer, (2018).

[3] A. Wagiman, M. S. Mustapa, R. Rosli Asmawi, S. Shamsudin, M. A. Lajis, and Y., Mutoh, “A review on direct hot extrusion technique in recycling of aluminium chips,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, pp. 641–653, (2020).

[4] J. Gronostajski, and A. Matuszak, “The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92, pp.35-41, (1999).

[5] B. Wan, W. Chen, T. Lu, F. Liu, Z. Jiang, and M. Mao, “Review of solid state recycling of aluminum chips, Resources,” *Conservation & Recycling*, vol.125, pp. 37–47, (2017).

[6] R. Taghiabadi, A. Rostamabadi, S. Tasvibi, and M. H. Shaeri, “Increasing the recycling percent in liquid-state recycling of Al machining chips by friction stir processing,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 243, pp. 122627, (2020).

[7] D. Paraskevas, K. Vanmeensel, J. Vleugels, W. Dewulf, Y. Deng, and J. R. Duflou, “Spark plasma sintering as a

solid-state recycling technique: The case of aluminum alloy scrap consolidation,” *Materials,* vol. 7, pp. 5664-5687, (2014).

[8] B. Xiong, L. Fang, X. Zhang, H. Hu, and C. Liu, “Development of the Aluminum Chips Recycling Process for Recovery Rates and Corrosion Resistance of A380 Alloy,” *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT),* vol. 4, pp. 1-12, (2015).

[9] A. E. Tekkaya, M. Schikorra, D. Becker, D. Biermann, N. Hammerb, K. Pantke, “Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol.209, pp. 3343–3350, (2009).

[10] J. B. Fogagnolo, E. M. Ruiz-Navas, M. A. Simón, and M. A. Martinez, “Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion,” *Journal of Materials Processing Technology,* vol.143-144, pp. 792–795, (2003).

[11]W. Tang, and A. P. Reynolds, “Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips,” *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 210, pp. 2231–2237, (2010).

[12]N. K. Yusuf, M. A. Lajis, M. I. Daud, and M. Z. Noh, “Effect of operating temperature on direct recycling aluminium chips (AA6061) in hot press forging process,” *Applied Mechanics and Materials,* vol. 315, pp. 728-732, (2013).

[13] M. A. Lajis, S. S. Khamis, and N. K. Yusuf, “Optimization of hot press forging parameters in direct recycling of aluminium chip (AA 6061),” *Key Engineering Materials,* vol. 622-623, pp. 223-230, (2014).

[14] M. I. Abd El Aal, E. Y. Yoon, and H. S. Kim, “Recycling of AlSi8Cu3 alloy chips via high pressure torsion,” *Materials Science& Engineering,* vol. 560, pp. 121–128, (2013).

[15] K. Suzuki, X. Huang, A. Watazu, and I. S. N. Saito, “Recycling of 6061 aluminum alloy cutting chips using hot extrusion and hot rolling,” *Materials Science Forum,* vol. 544-545, pp. 443-446, (2007).

[16] ASTM B429/B429M-20, “Standard Specification for Aluminum-Alloy Extruded Structural Pipe and Tube,” ASTM Internationa, (2020)

[17] S. Viswanathan, D. Apelian; R. J. Donahue, B. Das Gupta, M. Gywn, J. L. Jorstad, R. W. Monroe, M. Sahoo, T. E. Prucha, D. Twarog, *ASM Handbook, Volume 15-Casting,* ASM International, 2008, Avaiable: https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.9781627081870.

[18] X. Li, A. Scherf, M. Heilmaier, and F. Stein, “The Al-rich part of the Fe-Al phase diagram,” *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 37, pp.162-173, (2016).

[19] G. Vander Voort, B. Suárez-Peña, and J. Asensio-Lozano, “Microstructure investigations of streak formation in 6063 aluminum extrusions by optical metallographic techniques,” *Microscopy and Microanalysis,* vol. 19, pp. 276-283, (2013).